

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : **06-194708**  
 (43)Date of publication of application : **15.07.1994**

(51)Int.Cl.

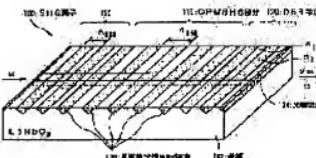
**G02F 1/37****G02B 6/12****H01S 3/109****H01S 3/18**(21)Application number : **05-209239**(71)Applicant : **OKI ELECTRIC IND CO LTD**(22)Date of filing : **24.08.1993**(72)Inventor : **SHINOZAKI KEISUKE  
MATSUI YASUHIRO  
KAMIJO TAKESHI**

(30)Priority

Priority number : **04294692** Priority date : **04.11.1992** Priority country : **JP****(54) SHG ELEMENT, SHG DEVICE AND METHOD FOR DECIDING EFFECTIVE REFRACTION FACTOR OF SHG ELEMENT****(57)Abstract:**

PURPOSE: To aim at the effective utilization of energy to a desired basic wavelength by obtaining an effective refraction basis of a real value of the change efficiency and a real value of the reflectance, and making this result feedback to the design of the SHG element.

CONSTITUTION: A substrate 102 of LiNbO<sub>3</sub> of an SHG element 100 is formed with an optical wave-guide 104. This optical wave-guide 104 is provided with periodical polarization reversing areas (domain reversing area) 106 so that refraction factors n1, n2 thereof are different from each other, and areas, of which period is changed locally, are provided to form parts for satisfying the simulation phase matching condition (QPM SHG part) 110 and parts for satisfying the black reflecting condition (DBR part) 120. With this structure, the SHG wave emitted from the SHG device in two directions are synthesized by an optical synthesizer to utilize the full of the energy output from an LD as a basic wave light source, and the SHG efficiency can be improved practically.

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application  
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of  
rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-194708

(43)公開日 平成6年(1994)7月15日

(51)Int.Cl <sup>6</sup> G 0 2 F 1/37 G 0 2 B 6/12 H 0 1 S 3/109 3/18	識別記号 9316-2K H 8106-2K 8934-4M	序内整理番号 F I	技術表示箇所
--	---	---------------	--------

審査請求 未請求 請求項の数12(全 18 頁)

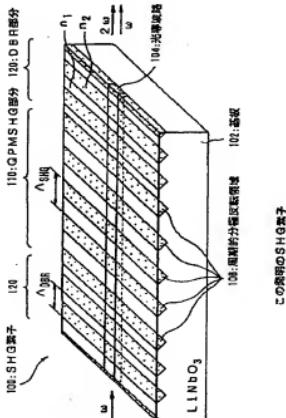
(21)出願番号 特願平5-209239	(71)出願人 000000295 沖電気工業株式会社 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号
(22)出願日 平成5年(1993)8月24日	(72)発明者 雄崎 啓助 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気 工業株式会社内
(31)優先権主張番号 特願平4-294692	(72)発明者 松井 康浩 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気 工業株式会社内
(32)優先日 平4(1992)11月4日	(72)発明者 上條 健 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気 工業株式会社内
(33)優先権主張国 日本 (JP)	(74)代理人 弁理士 大垣 幸

(54)【発明の名称】 SHG素子、SHG装置およびSHG素子の実効屈折率決定方法

## (57)【要約】

【目的】 SHG素子の基本波長に対する実効屈折率Nを正確に決定し、それにに基づき任意の基本波長に対応するSHG素子およびこのSHG素子を用いたSHG変換効率の高いSHG装置を提供する。

【構成】 SHG素子の光導波路に可変波長レーザを入射させてSHG変換効率が最大となる基本波の波長入射し、およびこの波長の近傍の波長で最大の反射を起こす波長 $\lambda_{\text{ref}}$ を求め、計算により実効屈折率および固有屈折率の差 $\Delta n$ 、従って、Nを求める。SHG素子の光導波路に、DBR部分とQPM、SHG部分とを個別に設ける。DBR部分は $\Delta n$ を用いて設計出来る。従って、任意の基本波長に対してDBRを設計でき、よって、SHG素子を設計できる。このSHG素子をL Dと光学手段を用いて光結合させて、SHG変換効率の高いSHG装置を得る。





0°Cとし拡散時間を約1時間とした例である。この分極反転の格子構造14に直交するように、プロトン交換法(Li<sup>+</sup>-H<sup>+</sup>交換法またはイオン交換法ともいう。)により、光導波路16が形成してある。

【0005】このSHG素子10の光導波路16に、角振動数 $\omega$ 、波長 $\lambda$ の基本波が図中左側の端面から入射するとする。入射光はあるm次(但し、m=0, 1, 2, 3, ..., n)の伝播モード(伝播模モード)で光導波路中を実効屈折率 $n(\lambda)$ で伝播する。周知の通り、この伝播の間に第2高調波の発生をSHG(Sex 2)が発生する。この第2高調波の発生をSHG(Sex

$$Lc = \lambda / [4 \{N(\lambda/2) - n(\lambda)\}]$$

但し、 $Nn(\lambda/2)$ はSH波のn次( $n = 1, 2, \dots, n$ )の伝播モードに対する実効屈折率であり、 $Nm(\lambda)$ は基本波のm次の伝播モードに対する実効屈折率である。

【0008】以下、説明を簡単にするために、光導波路16中を基本波もSH波も0次モードで伝播する場合を例に上げて説明する(すなわち、 $m = n = 0$ )。以後、ここでは、この場合の実効屈折率を単に $N(\lambda/2)$ および $N(\lambda)$ と書く。ここで、 $Lc$ は、(1)式から明らかなように、 $\lambda$ や光導波路の寸法に依存する。 $N(\lambda)$ は、非線形媒質(LiNbO<sub>3</sub>やKTiOPO<sub>4</sub>、: KTP等)の固有屈折率 $n(\lambda)$ にほぼ等しいが、光導波路の形状や伝播モードにも依存する。 $Lc$ の物理的な意味を説明すると、以下のような。

【0009】基本波が、光導波路16中をコヒーレント※  

$$\Delta k = (\pi/\lambda) [N(\lambda/2) - n(\lambda)]$$

この式からわかるように、位相不整合を0とするためには、 $N(\lambda/2) - n(\lambda) = 0$ であることが必要である。しかしながら、一般的に、屈折率は波長に依存するので、このようなことは起こらない。

【0010】そこで、従来は、図5に示すように、コヒ★  

$$N(\lambda/2) - N(\lambda) - \lambda/\lambda = 0$$

で与えられる。この条件のことを擬似位相整合条件またはQPM条件ともいう。尚、この(3)式についての参考文献として、文献11:「オプティックス・コミュニケーションズ(Optics Communications), Vol. 6, (1972), pp. 301-304」と、文献111:「ジャーナル・オブ・ライトウェーブ・テクノロジー(Journal of lightwave Technology), Vol. 7, No. 10, (1989), pp. 1597-1600」を挙げておく。

【0013】位相不整合が存在する場合でも、(3)式を満足するように周期的分極構造を形成すれば、基本波の伝播距離、従って、SHG素子の長さの2乗に比例するSH波を取り出しが出来る。

【0014】しかし、(2)式で与えられる条件は、次の2点において技術的に満足させることが難しい。

\* cond-Harmonic Generation)といい、この第2高調波をSH(Second-Harmonic)波と称する。このように、このSHG素子10では、基本波のエネルギーの一部分が第2高調波に移る。

【0006】今、仮に分極反転構造が形成されていないとする、次式で与えられるコヒーレント長(コヒーレンス長ともいう。)  $Lc$ だけ基本波が光導波路16中を伝播すると、基本波からSH波へのエネルギーの変換量が最大となる。

【0007】

$$\dots \quad (1)$$

※長さ  $Lc$ だけ伝播すれば、SH波の強度は極大となり、それからさらさらに  $Lc$ だけ進めば、SH波は強度は0となることを意味する。コヒーレント長  $Lc$  が無限大でなく有限な値であるということは、基本波とSH波との位相整合がとれておらず、位相不整合が存在する。位相不整合が存在すると、コヒーレント長  $Lc$  以上の長い距離にわたり光導波路を基本波が伝播してもSH波の強度はある一定値以上の大きさにはならないことを示している。コヒーレント長は数  $\mu$ m程度であるので、この程度の短い距離の基本波の伝播では非常に弱いSH波しか得られない。すなわち、充分な強度のSH波を得ようすると、位相不整合を0にしなければならない。

【0010】位相不整合を  $\Delta k$  とすると、この  $\Delta k$  は次式(2)で与えられる。

【0011】

$$\dots \quad (2)$$

★レート長  $Lc$  毎に分極反転領域14を設けて周期  $\Lambda$  (=  $2Lc$ ) の分極反転構造を形成して、位相不整合  $\Delta k$  を補完し、それにより基本波の伝播距離のほぼ2乗に比例した強度のSH波を取り出すようにしている。この位相不整合  $\Delta k$  を完全に補完するための条件は

$$\dots \quad (3)$$

【0015】[1] 実効屈折率  $N(\lambda)$ 、 $N(\lambda/2)$  が光導波路の寸法等に依存し、これを素子の設計(例えば  $\Lambda$  を幾らにしたら(3)式を満足させることができるか等)の段階で把握することが出来ない。

【0016】[2] 基本波光源なる半導体レーザ(LD)の発振波長を必要とされる精度で確定出来ない。すなわち、最適のLDを選択出来ない。(3)式を満足させるために要求されるLDの発振波長の精度は、数  $\mu$ m程度である(例えば、文献11:「ジャーナル・オブ・アプライド・フィジクス(Journal of Applied Physics), Vol. 71, (1992), pp. 22-27」参照。)。

【0017】[3] 仮に、上記条件を満たすLDとSHG素子との組み合わせが実現しても、SHG素子からの戻り光のためにLDの発振が安定せず、従って、安定してSHGを実現することが困難であった。

【0018】そこで、従来から、基本波光源として波長を可変出来る色素レーザ（或いは、Tl：サファイアレーザ等の波長可変レーザ）を用いて、（3）式の条件を満足させ、変換効率を大きくする方法をとっている。こうすることにより、充分な変換効率が達成されるようになった。

【0019】次の課題は、基本波光源として色素レーザを用いるとSHG装置が大型化してしまうこと、および、既に気体レーザ等で短波長レーザ光が得られる現在、色素レーザを基本光源として用いるSHG装置は実用的価値がほとんどないという問題を解決することにある。すなわち、あくまで、基本波光源としては、LDを利用しなければならないということである。

【0020】そこで、この出願の発明者らは、上述した課題の解決を図るために、先の特願平3-051930号において、SHG素子からの帰還によってLDの先振を擬似位相整合条件を満足する波長で安定的に規定する方法（以後、この方法を自己擬似位相整合法またはS-QPM法とも言う）を提案している。この発明の理解を容易にするために、ここでは、先ず、先に提案された技術につき、以下、簡単に説明する。

【0021】図6は、先に提案されている方法の説明に\*

$$\Delta = 2(2m-1) Lc = p \lambda / 2N \quad \dots (4)$$

この条件を具体的に  $L_i \text{NbO}_3$  を例にして説明する。また、基本波の波長は、1.3 μm近傍である場合を想定する。すなわち、LD22は、InP/InGaAsP系である。光導波路16は前述したイオン交換法で形成する。また、周期的分極反転構造14は、Tl: 烈散拡張

$$\begin{aligned} n^2(\lambda) - 1 &= 3.5567 - 2.805 \times 10^{-4} T^2 \\ &+ (0.970 \times 10^1 + 2.70 \times 10^{-4} T^4) \\ &\times [ \lambda^2 - (2.01 \times 10^2 + 5.4 \times 10^{-4} T^4)^{1/2} - 2.24 \times 10^{-4} \lambda^4 ] \end{aligned} \quad \dots (5)$$

但し、Tは空気温度、および入る波長である。ここで、光導波路の実効屈折率  $n(\lambda)$  が（5）式で近似出来るものとして、（4）式の条件をグラフにしたのが図7である。

【0026】図7は、横軸には基本波の波長 (nm) および縦軸にコヒーレント長  $L_c$  (nm) および40次から45次までの分極反転領域の寸法  $L_w$  (nm) をとった示した図である。同図において、コヒーレント長  $L_c$  をパラメータとしたときの、曲線の交点が（4）式の条件を満足する。しかし、 $L_i \text{NbO}_3$  の固有の屈折率は光導波路の実効屈折率とは僅かではあるが異なるはずである。そこで、とりえず、この近似に基づいて、分極反転周期を求めて、これを第一近似として話を進めるにとする。先の出願で発明者らが提案している方法に従って以下の作業を説明する。

【0027】LD22の利得が最大となる波長は、1.3 μm程度であったので、S-QPM SHGが実現する周期  $\Lambda$  は、上述した（4）式で  $p = 40 \sim 45$  とする

\* 供する、SHG装置20を拡大して模式的に示した斜視図である。22は半導体レーザ（LD）、24はレンズ等の光学的手段である。この装置20では、SHG素子10からの帰還によりLD22が発振する配置関係と成っている。この発振光が以下述べるように、QPM条件を満足するようになっている。

【0022】周期的分極反転格子はプラグ反射器（Distributed Bragg Reflector: DBRと略称する。）としても機能する。この周期  $\Lambda$  がQPM条件を満足し、かつ、基本波の波長に対して光反射条件を満足するようになっていれば、光導波路からの帰還光（DBRからの帰還光）によりQPM条件を満足する波長でLDが発振することになる。すなわち、S-QPMが実現することを意味する。ここで用いるLD22は、端面が低反射コーティング（以後、ARコーティングと称する。）されており、それ自身では通常の注入電流値では発振せず、あるバイアス電流を流した状態で分極反転格子からの帰還光を得て初めて発振するようにしておく。すなわち、次式（4）を満足するよう、 $\Lambda$  が形成されれば、S-QPMが実現することとなる。尚、この式（4）で  $p$  を正の整数とする。

【0023】

※法で形成する。

【0024】一方、 $L_i \text{NbO}_3$  の屈折率  $n(\lambda)$  の波長依存性は次式（5）の実験式で与えられる。

【0025】

と、波長  $1200 \sim 1400 \text{ nm}$  の範囲で  $\Lambda$  は約  $5.60 \sim 7.40 \text{ nm}$  の範囲と成る。従って、 $L_c$  との交点は、上記第一近似により、ほぼ  $6.0 \sim 7.0 \text{ μm}$  の範囲内に数点あると推定できる。すなわち、図7によれば、S-QPM SHGが実現するのはほぼ  $0.6, 6.25, 6.5, 6.75 \text{ μm}$  と推定される。そこで、この程度の周期のものをいくつ作り実験的に最適な周期を知った。実験によれば、分極反転構造の周期が  $6.5 \text{ μm}$  のものが適していることがわかった。この周期を図7中に、直線L<sub>1</sub>で示す。

【0028】図8により、この実験の概要を説明する。図8の構成は、SHG素子10を例えれば光ファイバ等の光学的手段30を介して基本波光源32と結合してあり、34、36は例えればレンズ等の光学系であり、38はLDである。尚、光学系36は基本波のモニタに用いるものであり、所要に応じて設ければ良い。また、40も、フィルタである。基本波光源32として用いたLD38の両端面は低反射コーティング（AR）してある。

入射端面の一方を予め光導波路の入射端面に位置合わせておいた光ファイバ30に接続する。このようにしておいて、LD38に電流を注入すれば発振してS-QPM SHGが実現し、フィルタ40からSH波が高出力する。

[0029] 図9にこのLD38の発振スペクトルを、図10にSHGスペクトルをそれぞれ示す。これらの図は、いずれも横軸(μm)に波長を取り、縦軸に光強度(任意の単位)をとって示してある。これらの図から、基本波光源の波長は、1.327μm、SH波の波長は662.4μmであることがわかる。ちなみに、LD38とSHG素子10との光学的結合をとてLD38の発振スペクトルを調べたところ、図11に示すスペクトル分布を得た。この実験結果からも理解出来るように、\*

$$N(\lambda) = n(\lambda) + \Delta n$$

ここで、 $\Delta n$ は、経験的波長 $\lambda$ にほとんど依存しない。この $\Delta n$ は、この出頭の発明者らが既に文献V:「ジャパニーズ・ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス (Japanese Journal Applied Physics), Vol. 31, (1992), pp. 2104-2108」で報告しているように、実験的にはほぼ0.05であることが知られている。勿論、この値は、LiNbO<sub>3</sub>についてであり、物質が異なるれば、当然この値も変わってくるし、厳密には光導波路の形状、形成方法にも依存する。従って、ここで基本的な問題は、次の3点となる。

[0032] ①SHG素子の設計の時点でこの $\Delta n$ を正確に知らなければ、S-QPM SHGを効率よく実現出来ないことを。従来は、この $\Delta n$ を求ること自体行なわれていなかった。

[0033] ②また、さきの出頭に係るS-QPM SHGにおいては、(4)式を満足する分極反転構造の周期は離散的にしか存在しないので、任意の波長に対してSH波を発生するSHG素子を設計することができない。

[0034] ③また、さきの出頭に係るS-QPM SHGにおいては、LDからの出射光がSHG素子の光導波路に入射するのは、この出射光の半分程度であり、従って、出射光を基本波光として有効的に利用出来ない。

[0035]

〔発明が解決しようとする課題〕従って、これまでに提案されているSHG技術においては、下記のような解決すべき課題がある。

[0036] 上記①について: 一般に、LiNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub>、KTP等に光導波路を形成する場合、光導波路の部分を周期的にイオン交換法を用いて屈折率を変える。具体的に説明すると、LiNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub>に対してはLi<sup>+</sup>イオンをH<sup>+</sup>イオンと交換する。このイオン交換には安息香酸やビロリン酸が使われる。

\* 図9のスペクトル中に生じていた発振ピーク(1.327μm)がなくなつて、なだらかなスペクトルとなつてゐるので、LD38の発振が停止したことが理解出来る。この実験から、分極反転構造の周期は6.5μmであることが図7から推定される。

[0030] 次に考察すべきことは、分極反転構造の周期の最適性についてである。すなわち、式(4)を完全に満足させる周期を求めるには光導波路の実効屈折率N(λ)を知る必要がある。このN(λ)はLiNbO<sub>3</sub>の固有の屈折率n(λ)すなわち式(5)で与えられる屈折率よりも僅かに大きくなつてゐるはずである。これを式で表現すれば、次式の通りとなる。

[0031]

... (8)

交換された部分はそれぞれLi<sub>x</sub>H<sub>1-x</sub>NbO<sub>3</sub>、Li<sub>x</sub>H<sub>1-x</sub>TaO<sub>3</sub>、(xは組成比を表す値であつて、0 < x < 1)となり、非交換部分よりも屈折率が高くなる。

[0037] KTPについては、K<sup>+</sup>イオンをRb<sup>+</sup>イオンと交換し、K<sub>1-x</sub>Rb<sub>x</sub>TiOPO<sub>4</sub>にする。

[0038] イオン交換には、RbNO<sub>3</sub>、Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の混合融液が使われる。交換された部分が非交換部分に比べてやはり屈折率が高くなり、また、分極方向が反転する。これらの屈折率変化量は、交換されたイオン濃度に比例する。イオン濃度は基板表面が一番高く、基板内部に進むにつれて低くなるように分布する。このような複雑な屈折率分布形状をした光導波路中を伝播する光に対する実効屈折率を解析的に求めることは実事上困難である。そこで、実験的にこの実効屈折率を求める必要があるが、従来は、この実効屈折率を求ることは行なわれていなかつたし、また、これを求める方法も提案されていなかつた。

[0039] ところで、仮に実効屈折率を求めることができたとしても、光導波路の周期的分極反転構造の周期を正確に形成することは、例えばフォトリソグラフィー及び熱拡散の技術では制約があり、また、SHG素子の温度変化によっても実効屈折率は変化してしまう。

[0040] 上記②について: 図7に示したように、交点は波長にして、ほぼ0.25μm間隔に飛び飛びに存在する。すなわち、この間の波長に対してはSHGを実現することが出来ない。

[0041] 上記③について: 図8に示した実験で用いたSHG装置の構成では、LDの出射光のうち、一方の端面からの出射光のみがSHG素子の光導波路に入射する構成となつてゐる。他方の端面からの出射光はこの構成ではスペクトルアナライザに導いてゐるので、実事上SHGに寄与していない。この実験では基本波光の波長をモニタするためにこのような配置を取っているが、実用上はこのスペクトルアナライザに導かれている基本波も有効に使われるようにするのが望ましい。このように

有効に使われるようになれば、光導波路中の基本波のエネルギー密度は2倍にすることができる、SH波の出力強度を4倍にすることが出来る。

【0042】この発明は、上述した諸課題に鑑みなされたものであり、従って、この発明はSHG素子及びSHG装置の設計に必要な実効屈折率を決定する方法、および任意の基本波長に対して、エネルギーの有効利用が図れるSHG素子およびSHG装置を提供することにある。

【0043】

【課題を解決するための手段】この目的の達成を図るために、この発明のSHGの実効屈折率決定方法によれば、\*

$$L = \lambda_{\text{se}} / (4 [n(\lambda_{\text{se}}/2) - n(\lambda_{\text{se}})]) \quad \dots \dots \dots \text{(a)}$$

$$\Delta n = [p \lambda_{\text{se}} / 4L] - n(\lambda_{\text{se}}) \quad \dots \dots \dots \text{(b)}$$

$$N = n + \Delta n \quad \dots \dots \dots \text{(c)}$$

但し、 $n(\lambda)$ は波長 $\lambda$ の光に対するSHG素子を構成している材料の固有の屈折率、 $L$ は分極反転構造の実効的な周期の $1/2$ 、および $p$ は、正の整数であって、 $\Delta n < 0 < \Delta n < 1$ の範囲に取らようとして規定する。

【0045】また、この発明のSHG素子によれば、擬似位相整合条件を満足することでSHGを実現するタイプのSHG素子であって、上述のSHG素子の実効屈折率決定方法を用いて決定した実効屈折率に基づいて設計された周期的分極反転構造を具えた光導波路の基板に設けたことを特徴とする。

【0046】また、好ましくは、上述のSHG素子において、光導波路の温度を制御する温度制御手段と、光導波路に電界を印加する電界制御手段とを具えることが望ましい。

【0047】また、好ましくは、温度制御手段が、基板の前記光導波路が設けられた面の裏面に設けたベルチエ素子からなることが望ましい。

【0048】また、好ましくは、電界制御手段が、光導波路上に設けた電極を以って構成されてなることが望ましい。

【0049】また、上述したSHG素子の実施例としては、基板を $L_i N b O$ 、基板とし、この $L_i N b O$ 、基板の+C面に周期的分極反転構造及び光導波路を設け、電極は、前記光導波路上に設けられた第1の電極と、 $L_i N b O$ 、基板の、第1の電極の両側の部分にこの第1の電極に沿ってそれぞれ設けられた第2の電極とで構成してあることが望ましい。

【0050】また、上述したSHG素子の他の実施例としては、基板を $L_i Ta O$ 、基板とし、この $L_i Ta O$ 、基板の-C面に周期的分極反転構造及び光導波路を設け、電極は、光導波路上に設けられた第1の電極と、 $L_i N b O$ 、基板の、第1の電極の両側の部分にこの第1の電極に沿ってそれぞれ設けられた第2の電極とで構成してあることが望ましい。

【0051】また、好ましくは、光導波路と前記第1の

\* 周期的分極反転構造を利用した光導波路を有し、擬似位相整合条件を満足するタイプのSHG素子を用い、該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該SHG素子のSHG変換効率が極大となる、基本波に対する波長 $\lambda_{\text{se}}$ を測定し、該SHG素子の光導波路に基本波を導波させて該光導波路の基本波に対する反射率が極大となる波長 $\lambda_{\text{res}}$ を測定し、これら波長 $\lambda_{\text{se}}$ および $\lambda_{\text{res}}$ から次の3つの式(a)、(b)、および(c)を用いて前記SHG素子を構成している光導波路の基本波に対する実効屈折率 $N$ を決定することを特徴とする。

【0044】



周期で分極反転構造を持つ光導波路を形成する。そして、波長可変レーザによりこの光導波路に対して SHG 変換効率が最大となる基本波の波長を先ず求める。このデータをもとにコヒーレンス長を求め、この結果から光導波路中を伝播する基本波の実効屈折率を数値解析により求める。これらの手続きにより  $\Delta n$  を求める。

【0072】SHG 素子の基板を  $\text{LiNbO}_3$  で形成した場合につき説明する。また、基本波光源として、 $\text{InP}/\text{InGaAsP}$  半導体レーザを使用する場合を想定して説明する。

【0073】先ず、 $\text{InP}/\text{InGaAsP}$  LD で、レーザ発振を起こす前は図 11 に示すようなスペクトルを示すものを用いる場合を例に挙げて説明する。この図 11 から明らかのように、この LD の利得の最大は  $1.32 \mu\text{m}$  である。基本波の波長がこの近傍である場合のコヒーレンス長と i.c.、DPR 条件 (第 40 次から第 45 次) を示したのが、既に説明した図 7 である。この図 7 は、周期的分極反転構造が擬似位相整合としての機能と DBR としての機能とを兼ねるための条件を与えている。

【0074】S-QPM SHG の原理に立ち返って考えると、SHG 素子からの帰還により LD が発振し、この発振光が QPM 条件を満足することが要点である。すなわち、この S-QPM SHG では、QPM を実現す

$$L = 3\lambda_{\text{se}} / [4(n(\lambda_{\text{se}}/2))]$$

を満足する L の値を求める。実験によれば、図 12 から分かるように、 $\lambda_{\text{se}} = 2.4 \text{ nm}$  である。この波長の固有屈折率  $n(\lambda_{\text{se}} = 9.24 \text{ nm}) = 2.164$  であり、また、 $n(\lambda_{\text{se}}/2 = 4.62 \text{ nm}) = 2.271$  であるので、既に説明した (5) 式にこれらの値を代入して計算すると、 $L = 6.498 \mu\text{m}$  となる。

【0077】次に、 $1.3 \mu\text{m}$  の近傍の光をだす発光ダイオード (LED) をもちいてこの光導波路からの反射特性を調べた。これによると、 $1.327 \mu\text{m}$  において、反射率の極大を観測した。この結果を既に説明した (10) 式に代入すると以下の結果となる。但し、ここでは、 $p = 4.3$  とする。

$$\begin{aligned} \Delta n &= p \times 1.327 / 4 \times 6.498 - 2.144 \\ &= 4.3 \times 1.327 / 4 \times 6.498 - 2.144 \\ &= 0.0513 \end{aligned}$$

このようにして、 $\Delta n$  を求めることが出来た。実験精度等から  $\Delta n = 0.05$  としてよい。この値  $\Delta n$  は基本波光源の波長が数十 nm 変わってもほとんど変化しないので、以下説明する SHG 素子の設計に有効な値として用いることが出来る。

【0079】もう少し  $\Delta n$  を精度良く求めるためには、製作条件を同一とした光導波路であって、分極反転構造の周期を数種類変えたものを用いて、それぞれにつき  $\Delta n$  を求めてそれらの平均値を求めれば良い。

\* るための分極反転構造部分と DBR 部分を兼用することが必須要件ではない。素子の設計の時点で、光導波路の実効屈折率が分かっていれば、DBR 機能を具える部分と QPM を実現するための部分とを分離して構成することが出来る。

【0075】そこで、ここでは先ず、既に説明した

(8) 式に従って、 $\Delta n$  を求める。以下、基本波光源として  $1.3 \mu\text{m}$  帯の LD を予定して行なった試作実験を例に挙げて、具体的な方法を説明する。

10 【0076】先ず、 $\text{InP}/\text{InGaAsP}$  LD で、レーザ発振を起こす前は図 11 に示すようなスペクトルを示すものを用いる場合を例に挙げて説明する。この図 11 から明らかのように、この LD の利得の最大は  $1.32 \mu\text{m}$  である。基本波の波長がこの近傍である場合のコヒーレンス長と i.c.、DPR 条件 (第 40 次から第 45 次) を示したのが、既に説明した図 7 である。この図 7 は、周期的分極反転構造が擬似位相整合としての機能と DBR としての機能とを兼ねるための条件を与えている。

20 【0077】S-QPM SHG の原理に立ち返って考えると、SHG 素子からの帰還により LD が発振し、この発振光が QPM 条件を満足することが要点である。すなわち、この S-QPM SHG では、QPM を実現す

$$L = 3\lambda_{\text{se}} / [4(n(\lambda_{\text{se}}/2))]$$

【0080】また、この実施例では、 $\text{LiNbO}_3$  を例にとって説明したが、他の材料であっても上述した実施例と同様にして  $\Delta n$  を求めることにより、光導波路の実効屈折率を知ることが出来る。

30 【0081】<変換効率を向上させるための温度及び電界制御手段の説明> 次に、上述の方法を用いて求めた実効屈折率に基づき、基板に設けた光導波路の周期分極反転構造の周期を決定した SHG 素子の例について説明する。

【0082】図 13 に示す SHG 素子は、より理想的な変換効率の達成を図るために、温度制御手段 300 と、電界制御手段 302 とを具えている。この SHG 素子は、 $\text{LiNbO}_3$  の基板 304 とこの基板 304 の +C 面に設けられた周期的分極反転構造 306 及び光導波路

40 308 とを具え、さらに周期的分極反転構造 306 の光導波路中に当たる部分に電界を加えるための電極として、光導波路上に誘電体膜 310 を介して設けられた第 1 の電極 302 a と、基板 304 の第 1 の電極 302 a の両側の部分にこの第 1 の電極 302 a に沿ってそれぞれ設けられた第 2 の電極 302 b とで構成した電極 302 を具えている。

【0083】また、基板 304 の電極 302 を設けた面の反対側の面には、温度制御手段としてのベルチエ素子 300 を具えている。

50 【0084】誘電体膜 310 は、光導波路 308 の屈折



〔0095〕次に、電圧を印加した場合のQPM条件およびDBR条件の変化の様子の計算結果を示す。図14は、SHG素子の光導波路に印加された電界とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。横軸は、基本波の波長(nm)を表し、縦軸は、反転分極構造の周期を表している。図中、コヒーレンス長(QPM条件)を満足する条件を曲線Ⅰおよび破線ⅠⅠを示してある。曲線ⅡⅡは、電極に電圧を印加していない時のDBR条件を示し、破線ⅣⅣは、電極に10Vの電圧を印加した場合のDBR条件を示している。図14に示すように、破線ⅠⅠおよびVⅠの交点の周期は、電圧を印加しない場合に比べて2nm短くなっている。従って、SHG素子の設計上の分極反転構造の周期と実際のSHG素子の周期との間に実効的にこの程度の差であれば、電圧を印加することによって補正をすることができる、SHG素子の変換効率を最大にすることができることがある。

〔0096〕次に、温度制御とQPM条件およびDBR条件との関係について説明する。一般に、SHG素子の温度を変化させることによって光導波路の屈折率が変化するところが知られている。

〔0097〕次に、温度を制御した場合のQPM条件およびDBR条件の変化の様子の計算結果を示す。図15は、SHG素子の光導波路の温度とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。横軸は、基本波の波長(nm)を表し、縦軸は、反転分極構造の周期を表している。図中、コヒーレンス長(QPM条件)を満足する条件を曲線Vおよび破線VⅠを示してある。曲線VⅡは、300Kの温度下の場合のQPM条件を示し、破線VⅣは、350Kの温度下のQPM条件を示している。一方、図中、(DBR条件)を曲線VⅠⅠおよび破線VⅣⅣを示してある。曲線VⅡⅡは、300Kの温度下のDBR条件を示し、破線VⅣⅣは、350KのDBR条件を示している。図15に示すように、破線VⅠⅠおよびVⅣⅣの交点の周期は、300Kの場合に比べて40nm長くなっている。従って、SHG素子の設計上の分極反転構造の周期と実際のSHG素子の周期との間に実効的にこの程度の差であれば、温度を制御することによって補正をすることができる、SHG素子の変換効率を最大にすることができることがある。

〔0098〕一般に、温度制御の方が、電界制御に比べて時間的な応答速度が速いので、温度制御によりおおよその補正を行っておいて、微調整を電圧の印加による電界制御によって行うことが望ましい。

〔0099〕また、現在のフォトリソグラフィの技術を用いれば、数十nmの精度でパターンを描画することができます。従って、現在のSHG素子の作製における作製

誤差は、温度および電界制御により十分に補正ができる。

〔0100〕尚、図14および図15に示した電界制御および温度制御の計算に当たっては、SHG素子の各パラメータとして以下の値を代入した。

$$G = 1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{m}$$

$$\tau_{\text{m}} = 3.2 \cdot 2 \times 10^{-12} \text{m/V}$$

$$n(1, 3 \mu\text{m}) = 2.14538$$

$$n(0, 6.5 \mu\text{m}) = 2.198824$$

$$p = 4.3$$

このように、SHG素子の製造誤差や動作時点での素子の温度により、分極反転構造の周期が理想的な条件からずれた場合も、このずれを補償して理想的な値に近い変換効率の達成を図ることができる。

〔0101〕尚、上述した温度制御及び電界制御手段は、S-QPM SHG素子のみならず、DBR部分とQPM部分とを個別に具えたSHG素子に用いることもできる。

〔0102〕<SHG素子の説明>次に、SHG素子につき説明する。先ず、従来の問題を解決するための手法を説明する。上述した式(4)の2つのパラメータm、pのうちmの値は実用的には1または2である。従って、LiNbO<sub>3</sub>を例に挙げて説明すると、コヒーレンス長Lcは基本波光の波長が1.3μm程度であれば6μm程度である。この程度の寸法であれば、現在の技術をもってすれば、周期的分極反転構造を形成することは容易である。従って、m=1について考察すると、これに対するpの値は4.0程度である。これらのことと、LiNbO<sub>3</sub>の屈折率を考慮すると、pの値が1異なれば(4)式で与えられる条件は0.25μm程度変化する。これは、コヒーレンス長が0.25μmに対応する基本波の変化分に相当する波長分以上細かくSHG波長を選択出来ないことを意味している。そこで、この発明では、DBR構造の部分とSHG素子としての部分とを同一の光導波路(一体的であってもまたは個別のであってもよい)において分離することによりこの問題を解決する。この時、上述した式(1)で求めた△nを用いる。

〔0103〕そこで、この発明のSHG素子は、SHG部分とDBR部分とは兼用せずに、光導波路に個別に設けてある。その一実施例を図1に示す。図1に示すSHG素子100の構造では、例えばLiNbO<sub>3</sub>の基板102に、既に説明したと同様な方法によって光導波路104を形成する。そして、この光導波路104には、屈折率n<sub>1</sub>、n<sub>2</sub>が交互に異なるように、周期的分極反転領域(ドメイン反転領域)106を設け、その周期を部分的に変えた領域を設けることによって、QPM SHG部分110とDBR部分120を構成する。この構成の仕方は種々あるが、この実施例では、QPM SHG部分110の左右両側にDBR部分120を設けて

あり、しかも、これらDBR部分120とSHG素子100の入射端および出射端を形成した例である。この両部分110および120の形成方法自体は同じであるが、それぞれの部分の分極反転周期が異なっている。DBR部分120は基本波の波長に対しては反射条件を満足するように、また、出来るだけ低次のブラック条件を満足するようにその周期 $\lambda_{100}$ を決定するのが良い。このとき、上述した実験により求めた $\Delta n$ を用いることは言うまでもない。

$$\Delta_{100} / 2 = p \lambda / 4 [n(\lambda) + 0.0531]$$

ここで、 $n(1.327) = 1.327 / 4 (2.144 + 0.0531) = 0.151$ となる。半導体レーザ(LD)への帰還効率は、 $p$ が奇数であるほうが大きいこと、およびフォトリソグラフィ等の都合を考えると、 $p = 7$ 程度が望ましい。そうすると、 $\Delta_{100} / 2 = 1.06\mu\text{m}$ となる。

【0106】一方、QPM SHG部分の半周期 $\lambda_{100}$ は既に説明したように、ほぼ6.5μmとすれば良い。※

$$R = \left[ \left( 1 - (n_1 / n_2) n_1 (n_2 / n_1) \right)^2 + \left[ 1 + (n_1 / n_2) n_1 (n_2 / n_1) \right]^2 \right]^{-1} \quad \dots (17)$$

$n_1 = n(1.327) + 0.0513 = 2.1953$ であり、また、

$n_2 = n(1.327) + 0.0513 + 0.001 = 2.1963$

であるから、750周期( $2X = 1500$ )とすれば、 $R = 0.3922$ となり、ほぼ40%の反射率が得られる。DBR部分の寸法は、 $1.06 \times 1500 = 1590\mu\text{m}$ 、すなわち、1.6mm程度である。

【0109】また、QPM SHG部分は5から10mmとすれば充分なSHG変換効率が得られるので、素子全体の寸法は6.6から11.6mm程度で充分であることになる。すなわち、従来のSHG素子に比べて10%程度(数mm程度)大きくなるにすぎない。

【0110】上述した実施例では、DBR部分をSHG部分の入射端側に1つだけ設けた例であるが、図1に示すように、SHG素子100の入出力端にDBR構造120をそれぞれ設け、このDBR部分120とSHG部分110を挟んだ構造としてもよい。このように構成すると、SHG素子100のSHG効率を高くすることが出来る。DBR構造120を入射端側のみの設けたSHG素子構造の場合と、入出力の両端側にDBR構造120をそれぞれ設けたSHG素子構造100とでは、SHG変換効率はDBRの反射率を $r$ として表すと、 $(1-r)^2$ 倍になることが知られているので、この2つのDBR構造120を両側に設けたSHG素子構造は、1つ目のDBR構造を具えたSHG素子構造の場合に比べて、 $(1-0.4)^2 = 1.67$ 倍となる。従って、このSHG素子100の長さはさらに1.6mm長くなるにすぎない。

【0111】このDBR部分およびQPM SHG部分

\* 【0104】ここで、SHG素子を一例として、図1に示した構造とは異なり、SHG素子の出射端側に設けた1つのSHG部分と、入射端側に設けた1つのDBR部分とをで構成した構造とする。そして、LiNbO<sub>3</sub>を例にとり、かつ、基本波の波長を1.327μm程度として、具体的に説明する。DBR部分の周期 $\lambda_{100}$ は次式(12)で与えられる。

$$[\text{0105}]$$

$$\dots (16)$$

\*従て、分極反転部分と非反転部分との屈折率差はほぼ10%程度である。このため、DBR部分の周期の数すなわちDBR部分の寸法は、反射率を40%程度に出来れば良いことを根拠に見積もれば、以下のようになる。

【0107】周期の数を $X$ とし、分極反転部分の屈折率を $n_1$ 、非反転部分の屈折率を $n_2$ とすると、DBR部分の反射率Rは次式(13)のように与えられる。

$$[\text{0108}]$$

$$R = \left[ \left( 1 - (n_1 / n_2) n_1 (n_2 / n_1) \right)^2 + \left[ 1 + (n_1 / n_2) n_1 (n_2 / n_1) \right]^2 \right]^{-1} \quad \dots (17)$$

は、光導波路が具えていればよいので、これらの配列順序や個数はこの発明では何ら限定されるものではない。

【0112】また、上述した実施例のSHG素子では、同一の基板の光導波路104がQPM SHG部分110とDBR部分120とを有した構造となっている。しかしながら、これに何ら限定されるものではなく、後述する図2に示す構造のように、このQPM SHG部分とDBR部分とを別の基板に設けて、それぞれを個別の素子部分として形成してもよい。勿論、その場合には、基板、光導波路の条件は両者とも同一とする。両者の相違は、単に、周期 $\lambda_{100}$ および $\lambda_{110}$ の値が異なるだけである。

【0113】<SHG装置の説明>次に、図2、図3および図4を参照して、この発明のSHG装置の実施例を説明する。

【0114】このSHG装置を設計するに当たり、従来の問題点を解決するためには、LDの片端面を高反射(HR)コーティングすれば良いと思われるが、現実には困難である。反対側の端面(SHG素子に接続する側)を反射率0に形成出来れば問題ないのであるが、現実には不可能であるため、僅かな残留反射によりファブリ・ペロモードによる発振を起こし、当初のS-QPM SHGの実現という目的を果たせない。そこで、この発明では、例えば、この反対側端面をHRコーティングする代わりにDBR構造を用いる。このDBRの設計に上述した $\Delta n$ を用いる。

【0115】そこで、図2は、SHG素子をQPM SHG部分とDBR部分を個別の基板に設け、それぞれQPM SHG部分の素子210およびDBR部分の素子50として構成する。これら素子をそれぞれQPM SHG

構造素子およびDBR構造素子と称する。これらを素子210および220を、入出射端面の両端面を高反射コーティングする代わりに低反射コーティングしてある半導体レーザ(LD)230と、光学手段240例えばレンズ系を用いて、光学結合させて、SHG装置を構成した例である。この場合、QPM-SHG部分の素子210およびDBR部分の素子220は、上述した実施例のSHG素子の場合と同様に、各基板200および202に設けた光導波路204および208が周期的分極反転領域(ドメイン反転領域)を互いに周期 $\lambda_{\text{c}}$ 、および $\lambda_{\text{w}}$ の、みを変えて有した構造と成っている。好ましくは、DBR構造素子220は反射率を大きくするため、十分な長さとするのが良い。例えば、DBR構造素子220の寸法を1.0mmとすると、反射率Rを9.8%以上にすることが出来る。

【0116】図3は、SHG装置の他の実施例を示す図である。この実施例では、LD230の両端面側に図1に示したと同様な構造のSHG素子100を配設して、レンズ系240を用いて、これらSHG素子とLD230と光学的に結合させた構造と成っている。この構造では、第2高調波であるSH波(2 $\omega$ )は、変換されなかった基本波( $\omega$ )と一緒に両素子から互いに反対な2方向に出射する。

【0117】図4に示す別の実施例のSHG装置の構造では、SHG効率を高めた構造であり、図3で示したSHG装置の構造の両出射端面に、所要に応じてレンズ系その他の光学的手段(図示せず)を介して、光ファイバ250および252を光学的に結合し、これら光ファイバ250および252を例えば光カプラー等の光合成手段260に結合して、第2高調波を効率よく取り出すことも出来る。

【0118】この発明は、上述した実施例にのみ限定されるものではなく多くの変更および変形を行ない得ることは当業者に明らかである。例えば、上述した実施例では、LiNbO<sub>3</sub>を基板の材料として用いたが、この発明では、例えばLiTaO<sub>3</sub>、またはKTnPを用いても良い。

【0119】

【発明の効果】この発明によれば、SHG素子の光導波路の実効屈折率をSHG変換効率とDBR反射率の実測値から求め、SHG素子の設計にこの結果をフィードバックさせてある。従って、SHG素子の設計の段階で正確に光導波路の実効屈折率を知ることができ、分極反転構造の周期等を一層理想的に設定出来る。

【0120】また、例えば、この発明の方法で決定した実効屈折率に基づいて設計されたSHG素子において、温度制御および電界制御により補正を行えば、ほぼ理想に近いSHG変換効率の実現を図ることが出来る。すなわち、LDを基本波光源としたQPM-SHG素子をSHG変換効率を理想限界に近い高い状態で利用すること

が可能となる。

【0121】そして、先に提案したSHG素子ではS-QPM-SHGにおいては分極反転構造の部分にDBRとしての機能も兼ねさせる必要があったが、この発明のSHG素子によれば、分極反転構造部分をDBRとしての機能を持たせる部分とQPMの機能を持たせる部分とに分離している。これにより、先に提案したS-QPM

SHGにおいては離散的波長のみSHG素子を設計して構成することが出来なかったが、この発明によれば、上述したように基本波としての任意の波長に対するSHG素子の実効屈折率を正確に求めることができるので、この実効屈折率を用いて、DBR部分の周期 $\lambda_{\text{c}}$ 、 $\lambda_{\text{w}}$ を知ることが出来、あらゆる波長に対応してSHG素子を設計して構成することが出来る。

【0122】この発明のSHG素子を用いてSHG装置を構成すると、SHG素子が光導波路中にQPM-SHG部分とDBR部分とを順次に具えるか、LDの一方の側にQPM-SHG部分を他方の側にDBR部分を設置することになるので、SHG効率を従来のSHG装置と比べて向上させることができるもの。また、SHG装置から2方向に出るSHG波を光合成器で合成すれば、基本波光源としてのLDの出力エネルギーを全て有効に使用出来る。このように、この発明のSHG装置によれば、SHG効率を実質的に向上させることができるもの。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明のSHG素子の構造の一実施例を概略的に示す斜視図である。

【図2】この発明のSHG装置の一実施例を概略的に示す斜視図である。

【図3】この発明のSHG装置の他の実施例を概略的に示す斜視図である。

【図4】SHG装置の2つのSHG出力を光合成手段を用いて合成する例を示す構成図である。

【図5】従来のSHG素子の構造の説明のための斜視図である。

【図6】従来のSHG装置の構造の説明のための斜視図である。

【図7】SHG素子の設計の説明に供する、基本波の波長に対するコヒーレンス長 $\lambda_{\text{c}}$ および $\lambda_{\text{w}}$ の関係を示す図である。

【図8】SHG装置の設計の説明のためのSHG装置の斜視図である。

【図9】SHG装置の設計の説明に供する、LDの発振スペクトル図である。

【図10】SHG装置の設計の説明に供する、SHGのスペクトル図である。

【図11】SHG装置の設計の説明に供する、LDのスペクトル図である。

【図12】この発明の実効屈折率決定方法の説明に供する、T<sub>i</sub>：サファイアレーザのスペクトル分布図である

50

る。

【図13】SHG素子の温度及び電界制御手段の説明に供する斜視図である。

【図14】SHG素子の光導波路に印加された電界とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。

【図15】SHG素子の光導波路の温度とQPM条件及びDBR条件との関係を示す図である。

【符号の説明】

100: SHG素子

102, 200, 202, 304: 基板

104, 206, 208, 308: 光導波路

\* 106, 218, 219: 周期的分極反転領域

110: QPM SHG部分

120: DBR部分

210: QPM SHG構造素子

220: DBR構造素子

230: 半導体レーザ 240: 光学的手段

250, 252: 光ファイバー

260: 光合成手段

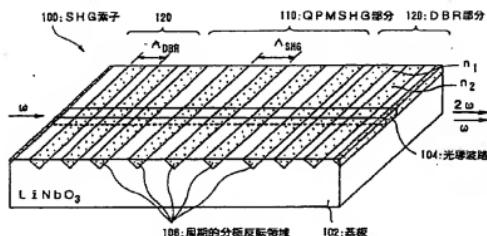
300: ベルチエ素子

306: 周期的分極反転構造

10 310: 誘電体膜

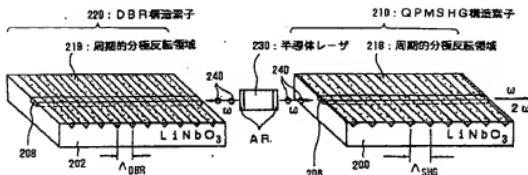
\*

[図1]



この発明のSHG素子

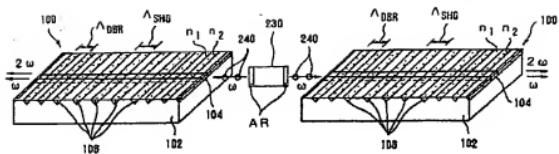
[図2]



200, 202: 基板 206, 208: 光導波路

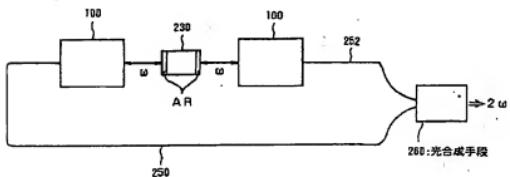
SHG装置の構造

【図3】



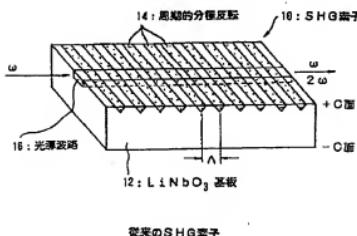
SHG装置の例

【図4】



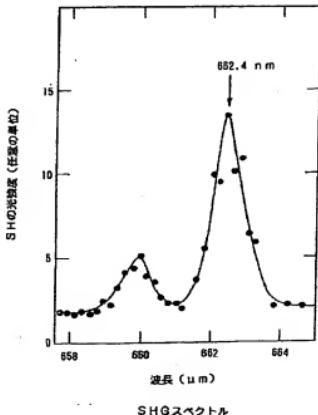
SHG装置の例

【図5】



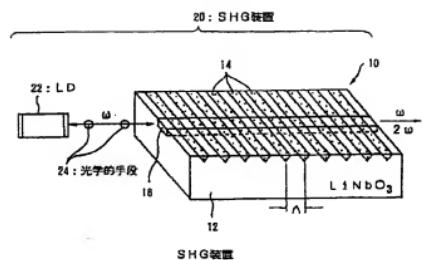
従来のSHG量子

【図10】

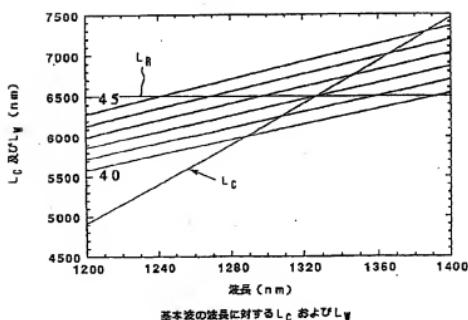


SHGスペクトル

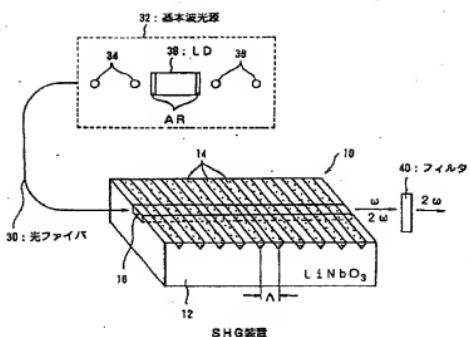
【図6】



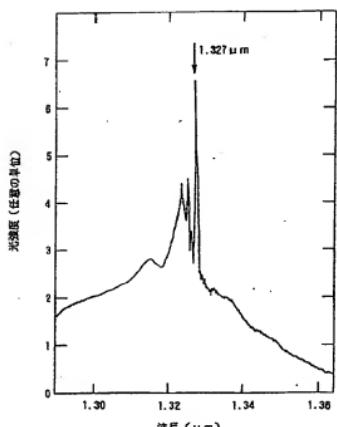
【図7】



[図8]

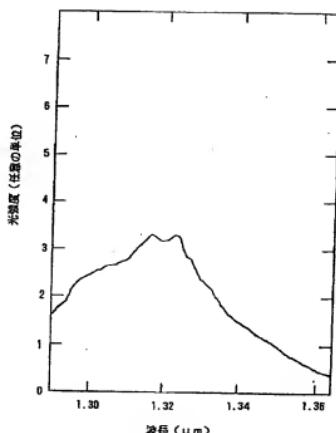


[図9]



発振スペクトル

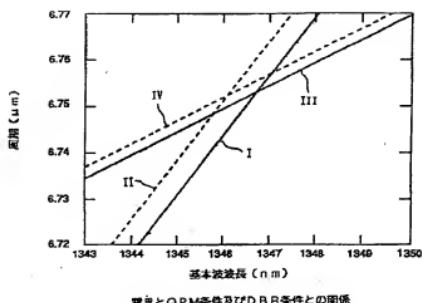
[図11]



LDのスペクトル

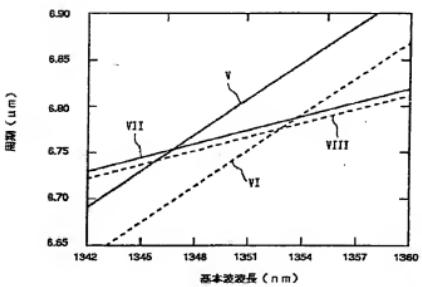


【図14】



電界とQPM条件及びDBR条件との関係

【図15】



電界とQPM条件及びDBR条件との関係